

Adaptive control system of high accuracy and low corrective energy consumption

Patent Number: US4914564
Publication date: 1990-04-03
Inventor(s): SURAUER MICHAEL (DE); BITTNER HELMUT (DE)
Applicant(s): MESSERSCHMITT BOELKOW BLOHM (DE)
Requested Patent: DE3606640
Application Number: US19870126939 19871028
Priority Number(s): DE19863606640 19860228
IPC Classification: G06F1/00; G06F15/20
EC Classification: G05B13/02A
Equivalents: EP0258333 (WO8705411), B1, JP2886532B2, JP63502700T, WO8705411

Abstract

PCT No. PCT/DE87/00075 Sec. 371 Date Oct. 28, 1987 Sec. 102(e) Date Oct. 28, 1987 PCT Filed Feb. 27, 1987 PCT Pub. No. WO87/05411 PCT Pub. Date Sep. 11, 1987. A control system having a main loop comprising a deadband section having variable thresholds. An adaptive network derives from a deviation signal, in one or more selected frequency ranges, by averaging, an adaptive signal which when injected into the deadband section allows its thresholds to be continuously or discretely adjusted in accordance with a desired function to increase the accuracy and reduce the corrective energy consumption of the control system.

Data supplied from the esp@cenet database - I2

THIS PAGE BLANK (USPTO)

00P 19190

23

①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ Off nl gungsschrift
⑪ DE 3606640 A1

⑤1 Int. Cl. 4:
G05B 13/02

②1 Aktenzeich n: P 36 06 640.0
②2 Anmeldetag: 28. 2. 86
④3 Offenlegungstag: 15. 10. 87

Patentamt

DE 3606640 A1

⑦1 Anmelder:

Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH, 8012
Ottobrunn, DE

⑦2 Erfinder:

Surauer, Michael, Dipl.-Ing., 8224 Chieming, DE;
Bittner, Helmut, Dipl.-Ing., 8000 München, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Adaptive Regeleinrichtung hoher Genauigkeit und geringen Stellenergieverbrauchs

Eine Regeleinrichtung hoher Genauigkeit und/oder niedrigen Stellenergieverbrauchs, welche ein Meßglied 12, einen Regler 13, ein Totzoneglied 14 sowie ein auf die Regelstrecke 16 einwirkendes Stellglied 15 enthält, soll so verbessert werden, daß unabhängig von schwankenden Umwelt- und Betriebsbedingungen eine gleichbleibend hohe Regelgüte erzielt wird, ohne die Stabilitätsverhältnisse zu verschlechtern. Hierzu werden die Ansprechschwellen des Totzonegliedes 14 zwischen vorgegebenen unteren und oberen Grenzen angepaßt, und zwar in Abhängigkeit von einem Signal, welches in einem Anpasszweig aus dem Reglerausgangssignal und/oder der Regelabweichung durch Mittelwertbildung über alle innerhalb eines oder mehrerer ausgewählter Frequenzbereiche liegenden Signalanteile gewinnbar ist. Weiterhin ist vorgesehen, die Steigung des Kennlinienabschnittes zwischen den Ansprechschwellen des Totzonegliedes 14 zwischen vorgebbaren unteren und oberen Grenzen zu variieren.

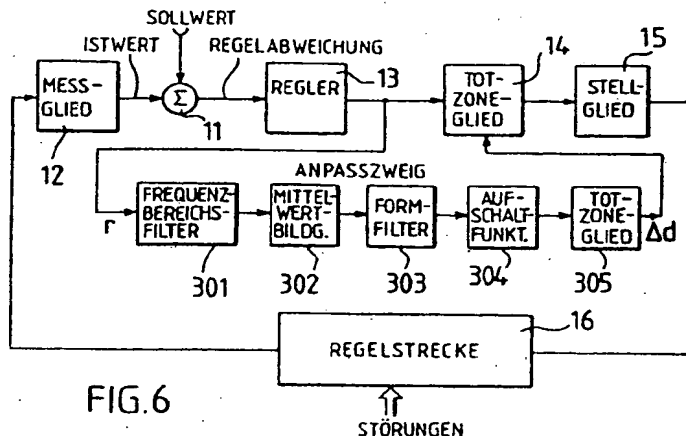


FIG. 6

DE 3606640 A1

Patentansprüche

1. Regeleinrichtung hoher Genauigkeit und/oder niedrigen Stellenergieverbrauchs, mit einem Meßglied, einem Regler, einem Totzoneglied und einer Kräfte und/oder Momente erzeugenden Stellgliedanordnung, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Beträge der Ansprechschwellen (d_1 , d_2) des Totzonegliedes (14) je zwischen einer fest vorgegebenen unteren (d_0) und einer variablen, einen vorgegebenen Maximalwert (L) nicht überschreitenden, oberen Grenze ($d_0 + \Delta d$) kontinuierlich oder in diskreten Schritten anpaßbar sind.
2. Regeleinrichtung hoher Genauigkeit und/oder niedrigen Stellenergieverbrauchs, mit einem Meßglied, einem Regler, einem Totzoneglied und einer Kräfte und/oder Momente erzeugenden Stellgliedanordnung, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Kennliniensteigung (z) des Totzonegliedes (14) zwischen seinen Ansprechschwellen (d_1 , d_2) zwischen einer fest vorgegebenen unteren (z_1) und einer variablen, einen vorgegebenen Maximalwert (z_2) nicht überschreitenden oberen Grenze anpaßbar ist.
3. Regeleinrichtung nach den Ansprüchen 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Anpassung des Betrages der Ansprechschwellen gleich- oder gegensinnig zueinander in Abhängigkeit von einem Signal erfolgt, das aus dem Reglerausgangssignal und/oder der Regelabweichung durch Mittelwertbildung über alle innerhalb eines oder mehrerer ausgewählter Frequenzbereiche liegenden Signalanteile gewinnbar ist.
4. Regeleinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, daß ein Signal zur Anpassung der Ansprechschwellen (d_1 , d_2) des Totzonegliedes (14) und/oder der Kennliniensteigung (z) zwischen den Ansprechschwellen in einem oder mehreren, vor oder hinter dem Regler (13) abzweigenden, jeweils mit dem Totzoneglied (14) verbundenen Anpaßzweigen gebildet wird, die aus Frequenzbereichsfiltern (301), Mittelwertbildnern (302), Formfiltern (303) und Aufschaltfunktionen (304) bestehen.
5. Regeleinrichtung nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Anpaßzweige zusätzlich ein Totzoneglied (305) enthalten, dessen Anspruchsschwellen auf vorgegebene Festwerte einstellbar sind.
6. Regeleinrichtung nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, daß das zusätzliche Totzoneglied (305) im jeweiligen Anpaßzweig zwischen dem Frequenzbereichsfilter (301) und dem Mittelwertbildner (302), zwischen dem Mittelwertbildner (302) und dem Formfilter (303), zwischen dem Formfilter (303) und der Aufschaltfunktion (304) oder nach der Aufschaltfunktion (304) einschaltbar ist.
7. Regeleinrichtung nach einem der Ansprüche 4 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, daß als Frequenzbereichsfilter (301) Hochpaßfilter, Bandpaßfilter, Tiefpaßfilter, Bandsperrefilter oder Kombinationen aus Serien- und/oder Parallelschaltung der vorgenannten Filterarten verwendbar sind.
8. Regeleinrichtung nach einem der Ansprüche 4 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Frequenzbereichsfilter die Übertragungsfunktion des Reglers (13) ganz oder teilweise enthalten.
9. Regeleinrichtung nach einem der Ansprüche 4 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, daß als Mittelwertbildner (302) in den Anpaßzweigen Einweggleichrichter, Doppelweggleichrichter, Spitzenwertgleichrichter oder gradzahlige Potenzen ihres Eingangssignals bildende Funktionselemente, z. B. Quadrierer, verwendbar sind.
10. Regeleinrichtung nach einem der Ansprüche 4 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, daß als Formfilter (303) in den Anpaßzweigen Tiefpaßfilter, Bandsperrefilter, Bandpaßfilter oder Serien- und/oder Parallelschaltungen der vorgenannten Filterarten verwendbar sind.
11. Regeleinrichtung nach einem der Ansprüche 4 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, daß als Aufschaltfunktionen (304) in den Anpaßzweigen lineare oder nichtlineare Kennlinien oder Funktionen, z. B. Verstärker mit Amplitudenbegrenzung oder Quadratwurzeln und dergleichen bildende Funktionselemente, verwendbar sind.
12. Regeleinrichtung nach einem der Ansprüche 4 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, daß der oder die Anpaßzweige aus einem Hochpaß erster Ordnung als Frequenzbereichsfilter (301), einem Doppelweggleichrichter als Mittelwertbildner (302), einem Tiefpaß erster Ordnung als Formfilter (303), einem Verstärker mit Amplitudenbegrenzung als Aufschaltfunktion (304) und einem Totzoneglied (305) mit fest vorgegebenen Ansprechschwellen gebildet werden.
13. Regeleinrichtung nach einem der Ansprüche 4 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, daß der oder die Anpaßzweige aus einem Hochpaß zweiter Ordnung als Frequenzbereichsfilter (301), einem Quadrierer als Mittelwertbildner (302), einem Tiefpaß zweiter Ordnung als Formfilter (303), einer Quadratwurzelfunktion als Aufschaltfunktion (304) und einem Totzoneglied (305) mit fest vorgegebenen Ansprechschwellen und Amplitudenbegrenzung gebildet werden.
14. Regeleinrichtung nach einem der Ansprüche 4 bis 13, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Ansprechschwellen im anpaßbaren Totzoneglied (14) des Hauptregelkreises über Aufschaltfunktionen des Anpaßzweiges so einstellbar sind, daß die Ansprechschwellen immer proportional sind zu einem statistischen Erwartungswert oder einem Effektivwert des Reglerausgangssignals über einen oder mehrere ausgewählte Frequenzbereiche.
15. Regeleinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, daß ein Totzoneglied (14) mit anpaßbaren Ansprechschwellen verwendet wird, das einen ersten, ein Eingangssignal (x) aufnehmenden Verstärker (201) enthält, dessen Ausgangssignal über zwei Potentiometer (203, 204) und jeweils an deren Abgriff angeschlossene, gegensinnig geschaltete Dioden (205, 206) einmal auf den Eingang zuführbar und zum anderen in einem zweiten Verstärker (202) mit dem Eingangssignal (x) summierbar ist, wobei am jeweils anderen Ende der Potentiometer (203, 204), z. B. über einen dritten (207) und vierten Verstärker (208), den negativen Schwellenwerten ($d_0 + \Delta d$) entsprechende Signale aufschaltbar sind.
16. Regeleinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Funktionselemente der Regeleinrichtung wie Reglernetzwerke, Totzoneglieder, Filter, lineare und/oder nichtlineare Kennlinien ganz oder teilweise durch funktionsmäßig äquivalente Algorithmen in einer fest verdrahteten oder programmierbaren Digitalelektronik realisierbar sind.

17. Regeleinrichtung nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß lineare Mittel- oder Erwartungswerte $E(r)$ eines Signals (r) nach der Rechenvorschrift

$$E(r) = \bar{r} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i$$

bestimmbar sind, wobei r_i Werte des Signals r zu den Abtastzeitpunkten t_i und N die Gesamtzahl der Werte darstellt, über die gemittelt wird.

18. Regeleinrichtung nach Anspruch 16 und 17, dadurch gekennzeichnet, daß quadratische Mittel- oder Erwartungswerte $E[(r - \bar{r})^2]$ eines Signals ($r - \bar{r}$) nach der Rechenvorschrift

$$E[(r - \bar{r})^2] = \sigma_r^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})^2$$

bestimmbar sind, wobei $(r_i - \bar{r})$ Werte des Signals ($r - \bar{r}$) zu den Abtastzeitpunkten t_i und N die Gesamtzahl der Werte darstellt, über die gemittelt wird.

19. Regeleinrichtung nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Funktion eines Totzonegliedes mit festen oder anpaßbaren Werten der Ansprechschwellen (d_1, d_2) durch die Rechenvorschrift

$$y = \begin{cases} x - d_1 & \text{für } x < d_1 \\ 0 & \text{für } d_1 \leq x \leq d_2 \\ x - d_2 & \text{für } x > d_2 \end{cases}$$

bestimmbar ist, wobei x das Eingangssignal und Y das Ausgangssignal des Totzonegliedes darstellt.

20. Regeleinrichtung nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß die nichtlineare Funktion einer Quadratwurzel (\sqrt{a}) eines Wertes (a) durch eine rekursive Rechenvorschrift der Form

$$x_{n+1} = \frac{1}{2} \left(x_n + \frac{a}{x_n} \right)$$

darstellbar ist, wobei x_n das Ergebnis des vorhergehenden Iterationsschrittes und x_{n+1} den verbesserten Funktionswert (\sqrt{a}) bedeuten, und die Iteration abgebrochen wird, wenn die Änderung ($x_{n+1} - x_n$) des Funktionswertes zweier aufeinanderfolgender Iterationsschritte unter einer vorgegebenen Schranke liegt.

21. Regeleinrichtung nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Funktion eines Totzonegliedes mit anpaßbaren Werten der Kennliniensteigung (z) zwischen festen oder ebenfalls anpaßbaren Ansprechschwellen (d_1, d_2) durch die Rechenvorschrift

$$y = \begin{cases} x - (z - 1)|d_1| & \text{für } x < d_1 \\ zx & \text{für } d_1 \leq x \leq d_2 \\ x + (z - 1)|d_2| & \text{für } x > d_2 \end{cases}$$

bestimmbar ist, wobei x das Eingangssignal und y das Ausgangssignal des anpaßbaren Totzonegliedes darstellt.

Beschreibung

Die Erfindung befaßt sich mit der Verbesserung der Genauigkeit und Stabilität von Regelsystemen besonders niedrigen Stellenergiebedarfs. Neben den für jeden Regelkreis charakteristischen Bestandteilen, nämlich (siehe Fig. 1) einem geeigneten Meßglied (12) zur Ermittlung der Abweichungen des zu regelnden Systems, der Regelstrecke (16), von seiner Sollage, einem Reglernetzwerk (13) (oder einem dessen Funktion entsprechenden Regelalgorithmus in einer programmierbaren Digitalelektronik) und einer, für die Regelung erforderliche Kräfte bzw. Momente erzeugenden Stellgliedanordnung (15) enthalten Regelkreise geringen Stellenergieverbrauchs der hier betrachteten Art zusätzlich ein Totzoneglied (14), das üblicherweise zwischen Reglernetzwerk (13) und Stellglied (15) angeordnet ist.

Ein Totzoneglied ist in seinen Übertragungseigenschaften dadurch definiert, daß es bei Eingangsgrößen, die betragsmäßig unterhalb eines bestimmten vorgegebenen Schwellenwertes liegen, kein Ausgangssignal liefert, die Schwellenwerte überschreitende Anteile der Eingangssignale jedoch in ihrer Frequenz und Phase unverändert, in ihrer Amplitude allerdings um den konstanten Schwellenwertbetrag verringert wiedergibt.

Neben Totzonegliedern der vorstehend genannten Art gibt es noch eine Reihe von hochgradig nichtlinearen Regelkreiselementen, die zur Ausführung von Schaltfunktionen dienen, wie beispielsweise Hystereseglieder, Relais- oder 3-Punkt-Glieder, die ebenfalls vorgegebene Ansprechschwellen enthalten können, wobei die Ansprechschwellen jedoch vorwiegend der Sicherstellung eindeutiger Schaltzustände dienen. Die Einführung einer künstlichen toten Zone in einen Regelkreis wirkt sich nun deswegen günstig auf den Stellenergieverbrauch aus, weil die Stellglieder nicht betätigt werden, solange die Regelabweichungen unterhalb der Ansprechschwelle des Totzonegliedes liegen. Erst wenn durch äußere Störungen oder dynamische Vorgänge im Regelkreis Abweichungen auftreten, die zum Überschreiten der Ansprechschwellen des Totzonegliedes führen, werden Kräfte

und/oder Momente im Sinne einer Verringerung der Abweichung, höchstens aber nur solange ausgelöst, bis die Ansprechschwellen wieder unterschritten sind. Vor allem während Zeiträumen und Betriebszuständen, in denen äußere, auf die Regelstrecke einwirkende Störungen gering sind, wird das System relativ lange im Bereich der Totzone verweilen und keine Stellenergie verbrauchen.

Aus diesem prinzipiellen Sachverhalt geht aber auch unmittelbar hervor, daß der Absolutwert der Ansprechschwelle ein direktes Maß für die erreichbare Genauigkeit des Regelsystems darstellt und die Forderung nach Einsparung von Stellenergie und Genauigkeit sich gegenseitig widersprechen. Wird der Bereich der Totzone reduziert, so nimmt zwar Genauigkeit zu, aber es steigt auch die Häufigkeit der Stelleingriffe und damit der Energieverbrauch. Wird andererseits überhaupt keine Totzone eingeführt, so werden die Stellglieder in unerwünschter Weise bereits durch das unvermeidbare System- und Meßwertrauschen aktiviert und eine Genauigkeitserhöhung durch die zunehmende stochastische Anregung der Regelkreisdynamik begrenzt. Darüber hinaus ist der Störpegel in einem Regelungssystem, d. h. Signalrauschen und Systemdynamik, neben äußeren Störungen in hohem Maße von Umwelt- und Betriebsbedingungen abhängig, wie z. B. Temperaturschwankungen, Parametertoleranzen, Alterungsprozesse und dergleichen, was eine erhebliche Schwankungsbreite und Unsicherheit im Systemverhalten herkömmlicher Regelkreise zur Folge hat und keine den wechselnden Betriebsbedingungen optimal angepaßte, feste Einstellung einer Totzone ermöglicht. Ist nämlich eine Totzone unter Berücksichtigung insbesondere des hochfrequenten Störpegels für nominale Bedingungen einmal auf einen festen Wert eingestellt, so ändert sich die "effektive Totzone", d. h. der zwischen Störampplituden und Schwellenwert verbleibende, tatsächlich wirksame Totzonenbereich, im umgekehrten Verhältnis zur Höhe des Störrauschens und damit das Verhalten des Regelkreises bezüglich Genauigkeit und Stellenenergiebedarf. Andererseits stellt in jedem Fall der wirksame Anteil einer künstlichen Totzone nicht vernachlässigbarer Größe in Regelkreisen ein wesentlich nichtlineares, insbesondere diskontinuierliches Übertragungsglied dar, das unter bestimmten Betriebsbedingungen Grenzzyklusschwingungen zur Folge hat. Bei linearen Systemen, d. h. bei Regelkreisen, deren Bestandteile — die Regelstrecke, Sensoren und Stellglieder — mit hinreichend guter Näherung durch lineare oder linearisierte Übertragungsglieder beschrieben werden können, wird deshalb die Einführung künstlicher Totzonen peinlich vermieden. In solchen Fällen wird der Einfluß des Meßwertrauschens üblicherweise durch lineare Tießpaßfilter soweit wie möglich unterdrückt, was sich jedoch auf die Systemstabilität nachteilig auswirkt, da Tießpaßfilter unvermeidliche Phasenverluste mit sich bringen.

Grenzzyklusschwingungen sind generell als besonders kritisch anzusehen, wenn sie in Regelkreisen auftreten, deren Regelstrecken schwingungsfähige Bauteile, insbesondere elastische Strukturelemente, enthalten. Dies ist vor allem bei Luft- und Raumfahrzeugen wegen ihrer leichten, gewichtssparenden Bauweise und/oder großen räumlichen Ausdehnung der Fall.

Wegen der extrem niedrigen Eigendämpfung solcher Strukturschwingungen neigen Regelsysteme für elastische Fahrzeuge dieser Art dazu, in Grenzzyklusschwingungen zu geraten, deren Frequenzen mit den Strukturresonanzfrequenzen zusammenfallen, was zu gefährlicher Schwingungsanregung, unzulässig hohen mechanischen Strukturbelastungen und schließlich zur Zerstörung der Fahrzeuge führen kann.

Darüber hinaus werden häufig zur Erzeugung der für die Stabilisierung erforderlichen Kräfte und/oder Momente diskontinuierlich arbeitende Stellglieder, wie Schrittmotoren oder pulsformig angesteuerte Reaktionsdüsen eingesetzt, deren sprunghafte Eingriffe in das System über ein breites Frequenzspektrum Resonanzanregungen begünstigen. Bei Lagerregelungssystemen für Fahrzeuge dieser Art wurden daher sogenannte modale Regler vorgeschlagen, d. h. daß die zuvor üblichen Reglernetzwerke bzw. Algorithmen zur gleichzeitigen Schwingungsdämpfung für jede Eigenschwingungsform um einen Beobachter zweiter Ordnung und einen zugehörigen Zustandsregler erweitert werden. Abgesehen von der hohen, mit der Zahl der zu berücksichtigenden Strukturschwingungsformen steigenden Komplexität und dem Realisierungsaufwand für den Regler werden solche Konzepte in der Praxis durch unvermeidliche Fehlanpassung der Beobachter infolge Unsicherheit und Schwankungsbreite der Modalparameter weitgehend unwirksam gemacht.

In einem anderen Fall wurde zur Verhinderung der Erregung von Strukturresonanzen die Hysterese-Breite des Hysterese-gliedes eines für die pulsformige Ansteuerung von Reaktionsdüsen verwendeten Puls-Breiten-Puls-Frequenzmodulators derart adaptiv verändert, daß die Folgefrequenz der Stelleingriffe nicht mit einer Strukturresonanzfrequenz zusammenfällt. Bei diesem Verfahren werden durch den Eingriff in ein hochgradig nichtlineares Element des Modulatorkreises, nämlich sein Hysterese-glied, gleichzeitig die Amplituden- und Phasenverhältnisse in einer für den Regelungstechniker schwer überschaubaren und nur durch aufwendige, nichtlineare Analyseverfahren angenähert bestimmbar Weise verändert.

Die vorliegende Erfindung hat sich nun die Aufgabe gestellt, mit möglichst einfachen Mitteln verbesserte Regelungseinrichtungen zu schaffen, die unabhängig von den jeweils gerade herrschenden Betriebs- und Umweltbedingungen und den damit verbundenen Schwankungen der Parameter und Signalverhältnisse eine gleichbleibend hohe Regelgüte, d. h. hohe Genauigkeit und geringen Stellenenergiebedarf, sicherstellen, ohne daß gleichzeitig eine Verschlechterung der Stabilitätsverhältnisse oder gar eine mögliche Resonanzanregung schwingungsfähiger Regelstrecken in Kauf genommen werden muß.

Dieser Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß die Beträge der Ansprechschwellen des (üblicherweise zwischen Regler und Stellglied angeordneten) Totzonen-gliedes zwischen einer fest vorgegebenen unteren und einer variablen, einen vorgegebenen Maximalwert nicht überschreitenden, oberen Grenze kontinuierlich oder in diskreten Schritten anpaßbar sind. Insbesondere soll die Anpassung der Beträge der Ansprechschwelle gleichsinnig in Abhängigkeit von einem Signal erfolgen, das aus dem Reglerausgangssignal oder der Regelabweichung durch Mittelwertbildung über alle, innerhalb eines oder mehrerer ausgewählter Frequenzbereiche liegenden Signaleanteile gewonnen wird. Die Anpassung kann automatisch, von Hand, kontinuierlich oder in diskreten Schritten erfolgen. Die Erfindung ist vorteilhaft sowohl in linearen wie auch in hochgradig nichtlinearen Regelsystemen einsetzbar und stellt in jedem Fall die Einhaltung optimaler Betriebsbedingungen bei

wechselnden Umweltbedingungen und Parameterschwankungen sicher.

Die wesentlichen Merkmale der Erfindung sollen nun, ausgehend vom Stand der Technik (Fig. 1 bis 3), anhand von Ausführungsbeispielen (Fig. 4 bis 9) näher erläutert werden. Es zeigen:

Fig. 1 Ein Blockschaltbild einer Regeleinrichtung hoher Genauigkeit und geringen Stellenergiebedarfs herkömmlicher Bauart,

Fig. 2 eine Eingangs-/Ausgangscharakteristik eines Totzonegliedes bekannter Bauart,

Fig. 3 ein Funktionsschaltbild für ein Totzoneglied bekannter Bauart,

Fig. 4 ein Ausführungsbeispiel eines anpaßbaren Totzonegliedes gemäß der Erfindung,

Fig. 5 eine Eingangs-/Ausgangscharakteristik eines Totzonegliedes mit anpaßbarer Kennliniensteigung zwischen den Ansprechschwellen gemäß der Erfindung,

Fig. 6 ein Blockschaltbild eines Regelkreises mit einer Regeleinrichtung gemäß der Erfindung,

Fig. 7 ein Blockschaltbild eines Regelkreises nach einer weiteren Ausführungsform der Erfindung,

Fig. 8 ein Funktionsschaltbild für ein Ausführungsbeispiel der erfindungsgemäßen Regeleinrichtung,

Fig. 9 eine weitere Regelvorrichtung nach der Erfindung.

Der prinzipielle Aufbau eines herkömmlichen Regelkreises geringen Stellenergiebedarfs gemäß Fig. 1 und seine Wirkungsweise wurden bereits eingangs beschrieben. Die Übertragungskennlinie eines Totzonegliedes ist in Fig. 2 wiedergegeben. Seine mathematische Funktionsdefinition lautet:

$$y = \begin{cases} x - d_1 & \text{für } x < d_1 < 0 \\ 0 & \text{für } d_1 \leq x \leq d_2 \\ x - d_2 & \text{für } x > d_2 > 0 \end{cases} \quad (1)$$

Bei Realisierung der Totzone als Algorithmus in einer programmierbaren, digitalen Reglerelektronik gibt diese mathematische Funktionsdefinition unmittelbar die Rechenvorschrift an.

Fig. 3 zeigt eine herkömmliche gerätetechnische Realisierung eines herkömmlichen Totzonegliedes mit festen Ansprechschwellen (d_1 , d_2) unter Verwendung von Operationsverstärkern (201, 202), Rückführpotentiometern (203, 204) und Dioden (205, 206). Für die positive Ansprechschwelle (d_2) ist der Einstellwert des Potentiometers (204) maßgebend, das zwischen dem Ausgang eines invertierenden Operationsverstärkers (201) und einer festen, positiven Referenzspannung ($+U_R$) liegt und dessen Abgriff über eine bezüglich der anliegenden Referenzspannung in Sperrichtung gehaltete Diode (206) direkt, d. h. ohne Vorwiderstand auf den Eingang (G) dieses ersten Operationsverstärkers (201) zurückgeführt ist. Beide Operationsverstärker (201, 202) sind, was in Fig. 3 nicht eigens gezeigt ist, in ihren mit "1" bezeichneten invertierenden Eingängen zusätzlich mit gleich großen Widerständen, d. h. als einfache Summiervverstärker beschaltet.

Für positive Eingangsschaltssignale x unterhalb der Ansprechschwelle d_1 sperrt die Diode (206) und das (negative) Ausgangssignal y bleibt Null, da sich die beiden gleich-großen Signale (x) am Eingang des zweiten Operationsverstärkers (202) über die direkte Verbindung einerseits sowie über den Umkehrverstärker (201) andererseits gerade aufheben. Wenn die Eingangsgröße x des Totzonegliedes den Schwellenwert d_1 gerade erreicht, liegt am Ausgang des ersten Operationsverstärkers (201) der invertierte Wert $-d_1$ an und bewirkt, daß das Potential am Abgriff des angeschlossenen Potentiometers (204) gerade durch Null geht, wodurch die dort angeschlossene Diode (206) leitend wird und den Rückführwiderstand des Operationsverstärkers (201) kurzschließt. Dadurch bleibt auch für höhere Eingangssignale ($x - d_1$) das Eingangssignal des ersten Operationsverstärkers (201) konstant auf dem negativen Schwellenwert $-d_1$ stehen und wird im nachgeschalteten zweiten Operationsverstärker (202) vom Eingangswert subtrahiert. Für negative Eingangssignale x des Totzonegliedes ergeben sich analoge Verhältnisse unter Berücksichtigung des über ein zweites Potentiometer (203) eingestellten Schwellenwertes d_2 und einer daran angeschlossenen zweiten Diode (205).

Die Ansprechschwellen d_1 , d_2 des Totzonegliedes sollen gemäß der Erfindung veränderbar sein. Dies kann z. B. dadurch geschehen, daß die Rückführpotentiometer (203, 204) nach Fig. 3 über einen Servomotor entsprechend der folgenden Einstellvorschriften nach vorgegebenen Funktionsverläufen für die Schwellenwerte d_1 , d_2 verändert werden:

$$\begin{aligned} \text{Pot. 203: } P_3 &= d_2 / (d_2 + U_R) \\ \text{Pot. 204: } P_4 &= d_1 / (d_1 + U_R) \end{aligned} \quad (2)$$

In Fig. 4 ist das Prinzipschaltbild einer wesentlich einfacheren Möglichkeit zur Realisierung anpaßbarer Ansprechschwellen für den vereinfachten Fall betragsmäßig gleicher positiver und negativer Schwellenwerte ($d_1 = d_2 = d$) gezeigt. Sind die Potentiometerwerte (P) für den niedrigsten Schwellenwert (d_0) unter Annahme einer zugehörigen Referenzspannung (U_0) festgelegt, so verschieben sich, wie eine einfache mathematische Umformung zeigt (Gleichung 3), bei unverändertem Potentiometerwert (P) die Ansprechschwellen (d) um einen Wert (Δd), proportional zur Änderung der Referenzspannung (ΔU):

$$\begin{aligned} \text{Pot. 203, 204: } P &= d_0 / (d_0 + U_0) \\ d &= PU / (1 - P) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} d &= d_0 + \Delta d & d_0 &= PU_0 / (1 - P) \\ U &= U_0 + \Delta U & \Delta d &= P \Delta U / (1 - P) \end{aligned}$$

Nominalwert (d_0) und Änderung (Δd) der Schwellenwerte (d) können damit über zusätzliche Verstärker (207, 208) unter Beachtung der Vorzeichen in einfacher Weise als Signalspannungsänderungen erzeugt und eingege-

ben werden. Nach dem gleichen Prinzip können natürlich auch die positiven und negativen Schwellenwerte im Bedarfsfall getrennt und verschieden voneinander angepaßt werden, indem man entsprechend verschiedene Referenzspannungsänderungen ($\Delta U_1, \Delta U_2$) anlegt.

Fig. 6 zeigt das Prinzipschaltbild einer verbesserten Regeleinrichtung gemäß der Erfindung. Der Regelkreis nach Fig. 1 ist dabei erweitert um einen Anpaßzweig, der vom Reglerausgangssignal gespeist wird und dessen Ausgangssignal seinerseits dazu benutzt wird, die Ansprechschwellen im Totzoneglied des Hauptkreises beispielsweise gemäß Fig. 4 zu verschieben. Der Anpaßzweig selbst besteht aus einem Frequenzbereichsfilter (301), einem Mittelwertbildner (302), einem Formfilter (303), einer Aufschaltfunktion (304) und eventuell einem Totzoneglied (305) bekannter Art (z. B. Fig. 2, 3) mit fest vorgegebenen Ansprechschwellen.

Das Frequenzbereichsfilter (301) dient zur Festlegung der Frequenzgrenzen, innerhalb derer eine Anpassung der Totzone im Hauptregelkreis erfolgen soll. Vorzugsweise werden hier Hochpaßfilter, Bandpaßfilter, aber auch Tießpaßfilter und je nach Anwendungsfall Kombinationen der genannten Filterarten in geeigneter Serien-/oder Parallelschaltung eingesetzt. Für die Mittelwertbildung (302) kommen alle Schaltungen oder Bauelemente infrage, die geeignet sind, aus dem Frequenzgemisch am Ausgang der Frequenzbereichsfilter (301) von Null verschiedene Mittelwerte oder Gleichanteile zu bilden, wie beispielsweise Einweggleichrichter, Doppelweggleichrichter, Spitzenwertgleichrichter, sowie gerade Potenzen ihres Eingangssignals bildende Funktionselemente, wie Quadrierer und dergleichen.

Im nachfolgenden Formfilter (303) des Anpaßzweiges gemäß Fig. 6 wird das Ausgangssignal des Mittelwertbildners geglättet bzw. es werden Signalanteile unerwünschter, z. B. hoher Frequenzen unterdrückt, wozu sich Tießpaßfilter erster und höherer Ordnung oder Bandsperren im besonderen Maße eignen.

Durch die Aufschaltfunktion (304) des Anpaßzweiges wird festgelegt, nach welchem funktionalen Zusammenhang die Ansprechschwellen des Totzonegliedes im Hauptregelkreis angepaßt werden sollen. Im einfachsten Fall kann es sich dabei um eine einfache lineare Verstärkungskennlinie mit Ausgangssignalbegrenzung handeln, wobei die Begrenzung sicherstellt, daß keine unerwünscht großen Erweiterungen des Totzonebereichs und damit verbundene Einbußen an Regelgenauigkeit auftreten können. Im allgemeinen Fall werden jedoch geeignete nichtlineare Verstärkungskennlinien wie z. B. inverse quadratische Kennlinien entsprechend Quadratwurzelfunktionen, logarithmische Kennlinien oder -funktionen und dergleichen zweckmäßiger sein, um den jeweiligen Anforderungen gerecht zu werden. In vielen Fällen empfiehlt es sich erfindungsgemäß, der Aufschaltfunktion ein Totzoneglied (305) mit unveränderlichen Ansprechschwellen nachzuschalten zur Unterdrückung der unvermeidbaren Restwelligkeit des Anpaßsignals sowie um einen definierten unteren Schwellenwert des anpaßbaren Totzonegliedes (14) im Hauptregelkreis sicherzustellen.

In den Fig. 8 und 9 sind zwei Ausführungsbeispiele der erfindungsgemäßen Anpaßkreise gezeigt. Zur Verdeutlichung der vorstehend beschriebenen Funktionseigenschaften sind die einzelnen Schaltkreiselemente in Form von Übertragungsfunktionen bzw. Eingangs-/Ausgangskennlinien dargestellt.

Fig. 8 zeigt einen Anpaßzweig einfacher Ausführung, bestehend aus einem Hochpaßfilter erster Ordnung als Frequenzbereichsfilter (301), einem Doppelweggleichrichter (302) als Mittelwertbildner, einem Tießpaß erster Ordnung als Formfilter (303), einem Verstärker mit einem allgemeinen Verstärkungsfaktor K und einer Amplitudenbegrenzung L als Aufschaltfunktion (304), sowie einem nullpunktsymmetrischen Totzoneglied (305) mit gleichen positiven und negativen Ansprechschwellen ($\pm d_1$).

In Fig. 9 besteht der Anpaßzweig aus einem Hochpaß zweiter Ordnung als Frequenzbereichsfilter (301), einem Quadrierer zur Mittelwertbildung (302), einem Tießpaß zweiter Ordnung als Formfilter (303), einer Quadratwurzelbildung als Aufschaltfunktion (304) und einem nachfolgenden Totzoneglied (305) mit Ausgangssignalbegrenzung (L).

In den beiden Ausführungsbeispielen der Fig. 8 und 9 werden durch die Hochpässe als Frequenzbereichsfilter aus ihren Eingangssignalen r durch Unterdrückung der niederfrequenten Anteile Signale gebildet, die der Abweichung ($r - \bar{r}$) vom linearen Mittelwert oder Erwartungswert ($E\{r\} = \bar{r}$) entsprechen. Durch die nachfolgenden, nichtlinearen Operationen der Gleichrichtung bzw. Quadrierung im Mittelwertbildner (303) entstehen erneut Gleichstromanteile bzw. Effektivwerte, die von hochfrequenten Signalanteilen überlagert sind. Durch die Tießpässe als Formfilter (303) werden die hochfrequenten Signalanteile unterdrückt, was der Bildung eines Erwartungswertes ($E\{|r - \bar{r}|\}$, $E\{(r - \bar{r})^2\}$) entspricht. Nach Fig. 8 werden die Ansprechschwellen des Totzonegliedes (14) im Hauptregelkreis proportional (Faktor K) zu dem gewonnenen Signal bis zu einem vorgegebenen Maximalwert L verändert, der die zulässige Erweiterung der Totzone nach oben begrenzt, während die untere Schwelle des adaptiven Eingriffs durch das nachgeschaltete, auf feste Werte eingestellte Totzoneglied (305) festgelegt wird.

Durch die Form der Aufschaltfunktion (304) entsprechend einer Quadratwurzelfunktion nach Fig. 9 erfolgt die Anpassung der Ansprechschwellen im Hauptregelkreis für alle Signale aus dem ausgewählten Frequenzspektrum entsprechend der "Varianz" (σ_r), wenn es sich um statistische Schwankungsgrößen handelt oder gemäß dem "Effektivwert" bei sinusförmigen Signalanteilen.

Auf das fest eingestellte Totzoneglied (305) im Anpaßzweig kann bei entsprechend großer Dämpfung der unerwünschten Signalanteile im Formfilter in vielen Fällen verzichtet werden. Bei anderen Anwendungen empfiehlt es sich, die Reihenfolge der Schaltkreiselemente Totzoneglied (305) und Aufschaltfunktion (304) zu vertauschen oder entsprechend Fig. 8 zu einem einzigen in der Funktion äquivalenten Übertragungsglied (305) zusammenzufassen.

Die gerätetechnische Ausführung der vorstehend in ihrer Wirkungsweise und ihren Übertragungseigenschaften beschriebenen Funktionselemente des Anpaßzweiges wie Filter, Gleichrichter, lineare und nichtlineare Eingangs-/Ausgangskennlinien bereitet dem Fachmann keinerlei Schwierigkeiten. Die Umsetzung der in analoger Darstellung gegebenen Filterübertragungsfunktionen und Übertragungskennlinien in entsprechende Digital-schaltungen oder Algorithmen für Prozeßrechner als Reglerelektronik ist dem Fachmann gleichermaßen geläufig.

fig. Übertragungsfunktionen sind durch Lösung der sie repräsentierenden linearen Differentialgleichungen mittels numerischer Integrationsverfahren oder über Transitionsmatrizen in einfacher Weise darstellbar. Für die Realisierung logischer Funktionen, nichtlinearer Kennlinien und algebraischer Rechenoperationen wie Quadrieren, Wurzelziehen usw. sind digitale Hilfsmittel im allgemeinen ohnehin besser geeignet als analoge. In vielen Fällen genügt es, statt anspruchsvoller und zeitaufwendiger Rechenroutinen in bekannter Weise einfache Näherungen zu verwenden wie beispielsweise Ersetzen der Integration einer Signalgröße r durch Summation über eine genügend große Anzahl N von Abtastwerten zur Bildung von Mittelwerten oder Erwartungswerten ($E\{r\}$, $E\{(r-\bar{r})^2\}$) entsprechend der Vorschrift:

$$E\{r\} = \bar{r} = \frac{1}{T} \int_0^T r(t) dt \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r(t_i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i \quad (4)$$

für den linearen Mittel- oder Erwartungswert bzw.

$$E\{(r-\bar{r})^2\} = \sigma_r^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (r-\bar{r})^2 dt \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})^2 \quad (5)$$

für den quadratischen Mittel- oder Erwartungswert, wobei $r_i = r(t_i)$ die Funktionswerte r zu den Abtastzeitpunkten t_i darstellt.

In anderen Fällen empfiehlt sich die Verwendung von Iterationsverfahren und/oder Rekursionsformeln, wie z. B. zur Bildung der Quadratwurzelfunktion die iterative Lösung einer Beziehung der Form:

$$x_{n+1} = \frac{1}{2} \left(x_n + \frac{a}{x_n} \right) \quad (6)$$

wobei a das Argument der Funktion, x_n das Ergebnis des vorhergehenden Iterationsschrittes und x_{n+1} den verbesserten Funktionswert von \sqrt{a} bedeuten. Als Anfangswert ($n=0$) kann ebenfalls das Argument a der Funktion verwendet und die Iteration abgebrochen werden, wenn die Änderung des Funktionswertes ($x_{n+1} - x_n$) zweier aufeinanderfolgender Iterationsschritte unter eine vorgegebene Genauigkeitsschranke sinkt.

Regelrichtungen gemäß der Erfindung, die mit adaptiven Totzonegliedern und deren Ansprechschwellen steuernden Anpaßzweigen ausgestattet sind, weisen gegenüber herkömmlichen Einrichtungen erhebliche Vorteile auf und sind gleichermaßen für lineare als auch hochgradig nichtlineare Regelsysteme einsetzbar. Durch die im Anpaßzweig vorgenommene Analyse, Bewertung und Gewichtung der Signalanteile des Hauptregelkreises über ausgewählte Frequenzbereiche und Anpassung des Totzonebereichs an die jeweils gerade herrschenden Verhältnisse läßt sich im allgemeinen eine beträchtliche Verbesserung, mindestens aber auch bei wechselnden Betriebs- und Umweltbedingungen gleichbleibende Güte des Regelverhaltens erzielen.

Wird z. B. entgegen der herkömmlichen Praxis in ein lineares Regelsystem eine adaptive Totzone eingeführt und ihr unterster einstellbarer Wert kleiner oder gleich der Varianz σ , d. h. dem sogenannten Ein-(bzw. zwei-) σ -Wert des unter allen Betriebsbedingungen zu erwartenden niedrigsten System- und Meßwertträuschens gewählt, so werden die höheren Amplituden der hochfrequenten Störungen die Ansprechschwellen des Totzonegliedes im Hauptkreis immer überschreiten und damit einen Linearisierungseffekt erzeugen, der die Totzone effektiv nicht in Erscheinung treten läßt, die Linearität des Kreises praktisch nicht beeinflußt, keine unerwünschten Grenzzyklusschwingungen zur Folge hat und trotzdem eine erhebliche Reduktion des Störpegels bewirkt, der bei stochastischen Störungen mit Gaussverteilung 68% bzw. 95,5% beträgt und sich auf die Systemdynamik und den Stellenergieverbrauch vorteilhaft auswirkt. Erhöht sich infolge der Betriebsbedingungen, z. B. durch Temperaturschwankungen, der Störpegel, so wird die Totzone bei entsprechender Ausbildung des Anpaßzweiges nachgeregelt und damit das günstige Regelkreisverhalten weiterhin sichergestellt.

Nichtlineare Regelsysteme, die z. B. aus Gründen der Einsparung an Stellenergie oder der Verwendung diskontinuierlich arbeitender Stellglieder wie pulsformig angesteuerter Reaktionsdüsen bewußt mit einer wirksamen Totzone ausgestattet sind, lassen sich bei Anwendung der erfindungsgemäßen adaptiven Regelung optimal auf das gewünschte Verhalten bezüglich Genauigkeit, Stellenergieverbrauch, Grenzzyklusfrequenz und Amplitude einstellen, da der wirksame, zwischen Störpegel und den Ansprechschwellen verbleibende Anteil der Totzone auch bei Änderungen des Meßwertträuschens und der Regelkreisdynamik infolge der automatischen Anpassung erhalten bleibt.

Besonders vorteilhaft läßt sich die erfindungsgemäße Einrichtung bei der Stabilisierung von Regelstrecken einsetzen, die wegen ihrer konstruktiven Gestaltung, ihrer Materialeigenschaften, ihrer leichten, gewichtssparenden Bauweise und/oder ihres hohen Schlankheitsgrades Strukturschwingungen, insbesondere mit geringem passivem Dämpfungsmaß, aufweisen. Liegen durch geeignete Wahl der Eckfrequenzen diese Schwingungen im Durchlaßbereich der Frequenzbereichsfilter und werden die nachfolgenden Schaltkreiselemente des Anpaßzweiges entsprechend so ausgebildet, daß der Hauptregelkreis durch den adaptiven Eingriff auf Strukturschwingungen nicht reagiert, dann können keine Grenzzyklusschwingungen bei Strukturresonanzfrequenzen, damit verbundener hoher Stellenergieverbrauch, keine gefährlichen Strukturbelastungen und oszillatorischen Instabilitäten auftreten.

Betrachtet man zum einfacheren Verständnis des Erfindungsgedankens einen an sich linearen Regelkreis, der im Normalfall keine wirksame Totzone enthalten soll, so wird ein zum Zwecke der Stabilisierung von Strukturschwingungen eingeführtes Totzoneglied im Hauptregelkreis zweckmäßigerweise so nachgeregelt, daß die

Strukturschwingungsamplituden im Reglerausgangssignal die Ansprechschwellen gerade nicht überschreiten können. Die hochfrequenten oszillatorischen Signalanteile wirken dann wie ein sogenanntes "Dither-Signal" linearisierend über den vollen Totzonebereich, behindern aber niederfrequente Regelbewegungen, denen im Hauptkreis die oszillatorischen Signale überlagert sind, deswegen nicht, weil sich die Anpassung der Totzone infolge der Frequenzbereichsauswahl im Anpaßkreis nur nach den Amplituden der hochfrequenten Signalanteile richtet. Für Signale aus dem durch den Anpaßkreis bestimmten Frequenzspektrum ist die Verstärkung im Hauptregelkreis damit praktisch gleich Null, was dazu führt, daß eventuell zufällig angeregte Strukturschwingungen mit ihrer Eigendämpfung abklingen. Im gleichen Maß wird aber auch der Totzonebereich verkleinert und gleichbleibendes Regelverhalten sichergestellt. Mit Hilfe der erfindungsgemäßen Regeleinrichtung ist es daher möglich, an sich nur für die Regelung und Stabilisierung von starren Fahrzeugen geeignete, einfachere und erprobte Reglerkonzepte auch zur Regelung von elastischen Fahrzeugen einzusetzen, bei denen sonst erhebliche aufwendigere Reglerstrukturen, wie etwa modale Regler erforderlich sind. Im vorliegenden Fall kann es auch zweckmäßig sein, die Reihenfolge der Schaltkreiselemente zu verändern, z. B. das fest eingestellte Totzoneglied im Anpaßkreis zwischen Frequenzbereichsfilter und Mittelwertbildner einzufügen, wodurch bewirkt werden kann, daß die Anpassung der Totzone erst in Kraft tritt, wenn bestimmte, durch die Ansprechschwellen vorgegebene unkritische Strukturschwingungsamplituden überschritten werden. Neben den in den Ausführungsbeispielen gezeigten Schaltkreiselementen kommen hier insbesondere Bandpässe, Bandsperren und dergleichen allein und in geeigneter Serien- und Parallelschaltung zur Trennung verschiedener Frequenzbereiche als Frequenzbereichsfilter und/oder Formfilter, und Spitzenwertgleichrichter als Mittelwertbildner infrage. Eine konsequente Weiterführung des Erfindungsgedankens führt zur Parallelschaltung vollständiger, für verschiedene Frequenzbereiche wirksamer Anpaßzweige und Überlagerung ihrer Eingriffe auf das Totzoneglied des Hauptkreises.

Die vorstehend beschriebene Stabilisierung von Strukturschwingungen in elastischen Fahrzeugen mittels eines adaptiven Totzonegliedes bei gleichzeitiger Verbesserung des Regelkreisverhaltens gegenüber herkömmlichen Systemen läßt sich auch noch auf eine andere Art erzielen. Da der Stabilisierungseffekt durch Absenkung der Regelkreisverstärkung für Strukturschwingungsamplituden im Totzonebereich bewirkt wird, ist es auch denkbar, mit Hilfe des Anpaß-Signals die Form der Kennlinie des Totzonegliedes zwischen den Ansprechschwellen im Sinne einer Verstärkungsanpassung zu verändern, etwa gemäß der Vorschrift (siehe Fig. 5):

$$y = \begin{array}{ll} x - (z-1)d_1 & \text{für } x < d_1 \\ zx & \text{für } d_1 \leq x \leq d_2 \\ x + (z-1)d_2 & \text{für } x > d_2 \end{array} \quad (7)$$

wobei x die Eingangsgröße, y die Ausgangsgröße, d_1 und d_2 die untere bzw. obere feste Grenze des Anpaßbereiches und z den z. B. in einem der beschriebenen Anpaßzweige gebildeten Anpaßparameter (Δd) darstellen. Dabei soll

$$z_1 \leq z \leq z_2$$

sein, und insbesondere kann $z_1 = 0$ und $z_2 = 1$ gewählt werden. Für den Anpaßparameter ($z = \Delta d$) an seiner unteren Grenze ($z = \Delta d = z_1$, z. B. $z_1 = 0$) ist ein Totzoneglied gemäß Fig. 2 definiert, dessen Kennliniensteigung zwischen den festen Ansprechschwellen d_1 und d_2 mit zunehmenden Werten des Anpaßparameters ($z = \Delta d \neq 0$) von Null verschiedene, ebenfalls zunehmende Werte annimmt, bis schließlich am oberen Grenzwert des Anpaßparameters ($z = \Delta d = z_2$ z. B. $z_2 = 1$) die Totzone völlig verschwindet. In Fig. 5 ist ein diesen Verhältnissen entsprechendes Kennlinienfeld des erfindungsgemäßen anpaßbaren "Totzonegliedes" variabler Verstärkung für drei Werte des Anpaßparameters ($z = 0; 0,5; 1$) schematisch dargestellt. Die Realisierung eines solchen Funktions-Elements nach der Vorschrift von Gl. (7) in einem Digitalrechner liegt auf der Hand. Der Entwurf einer entsprechenden Analogschaltung mit Hilfe eines Multiplizierers bereitet dem Fachmann ebenfalls keine Schwierigkeiten.

Es ist leicht einzusehen, daß die Kombination verschiedener Merkmale der Erfindung, insbesondere eine Anpassung der Schwellenwerte d_1 und d_2 sowie der Kennliniensteigung im dazwischenliegenden Bereich ($d_1 \leq x \leq d_2$) in Abhängigkeit von Signalen ($z, \Delta d$), die aus dem Reglerausgangssignal und/oder der Regelabweichung in zugehörigen Anpaßzweigen gebildet werden, erhebliche zusätzliche Vorteile in der Praxis bringen kann.

Dabei muß auch nicht immer nur eine gleichsinnige Verstellung, d. h. zunehmender Betrag der Schwellenwerte d_1 und d_2 bzw. zunehmende Kennliniensteigung (z) bei zunehmenden Werten des Anpaßsignals ($z, \Delta d$) zweckmäßig sein, sondern auch Kombinationen gegensinniger Verstellungen für überlappende oder sich gegenseitig ausschließende Teilbereiche der Anpassung über ausgewählte Frequenzbereiche oder Amplitudenbereiche. Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, daß für den erfindungsgemäßen Zweck nicht nur die in der Regelungstechnik vorwiegend verwendeten relativ einfachen Ausführungsformen der wiederholt angesprochenen Filterarten einsetzbar sind, sondern auch alle in der Nachrichtentechnik gebräuchlichen aktiven und passiven Filternetzwerke, wie z. B. Tschebyscheff-Filter, Cauer-Parameter-Filter, Butterworth-Filter, "notch"-Filter und dergleichen. Ihre Verwendung ist sonst in der Regelungstechnik wegen der großen Phasenverluste im Durchlaßbereich oder ihrer Resonanzeigenschaften nur bedingt möglich. Die Verwendbarkeit im Rahmen der vorliegenden Erfindung liegt darin begründet, daß für das Anpaßsignal nur die Amplitudenverhältnisse, nicht aber die Phasenlage der Signale aus dem ausgewählten Frequenzbereichen maßgebend sind.

Mit der Erfindung ist dem Regelungstechniker eine Vielfalt von Möglichkeiten an die Hand gegeben, herkömmliche lineare und nichtlineare Regelsysteme bezüglich ihrer Genauigkeit, ihrem Stellenenergiebedarf, ihrer

Stabilität und ihrer Empfindlichkeit gegenüber Schwankungen der Betriebs- und Umweltbedingungen zu verbessern. Bei der Dimensionierung des Anpaßzweiges ist vom Signalspektrum des Hauptregelkreises auszugehen, und die Anpaßbedingungen richten sich nach den Amplitudenverhältnissen der Signale bei den jeweiligen Frequenzen oder in den entsprechend ausgewählten Frequenzbereichen. Aus der angestrebten Wirkungsweise nach der Erfindungsbeschreibung geht hervor, daß die Bandbreite des Anpaßsignals (Δd nach den Fig. 8 und 9) immer erheblich, d. h. größenordnungsmäßig um einen Faktor fünf bis zehn, niedriger sein sollte als die untere Eckfrequenz des für die Adaption ausgewählten und maßgebenden Frequenzbereichs im Hauptregelkreis.

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

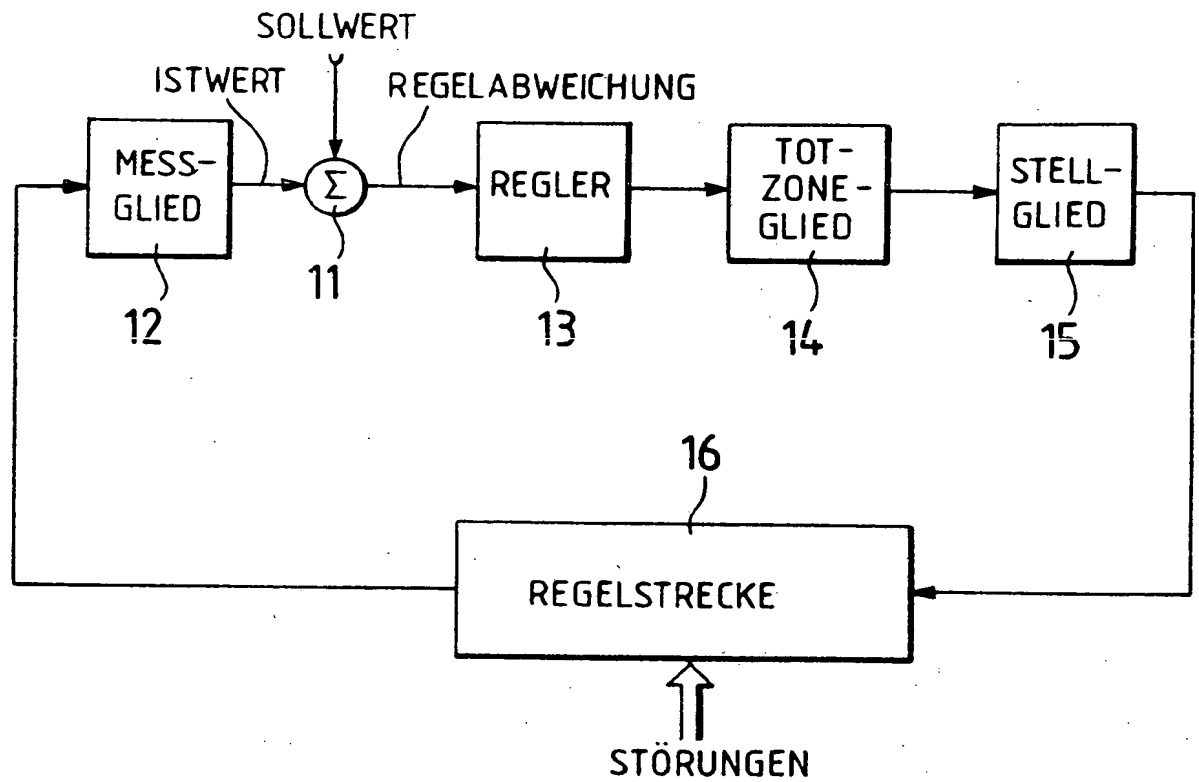


FIG. 1

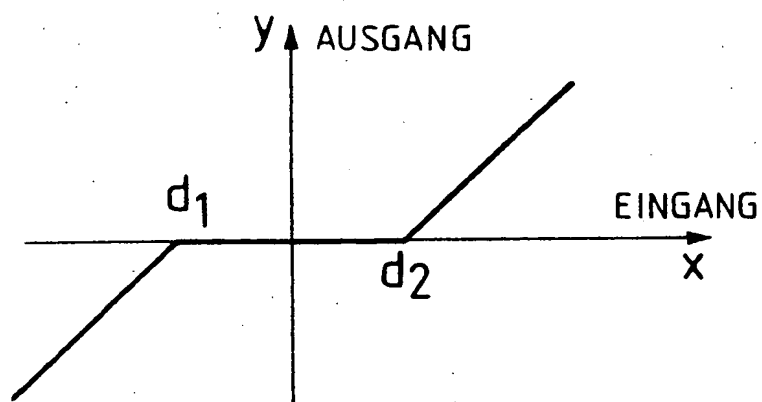


FIG. 2

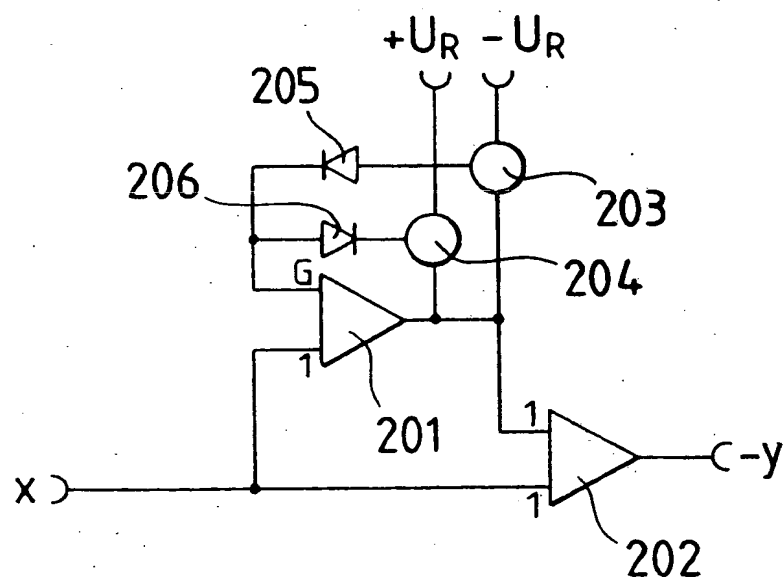


FIG. 3

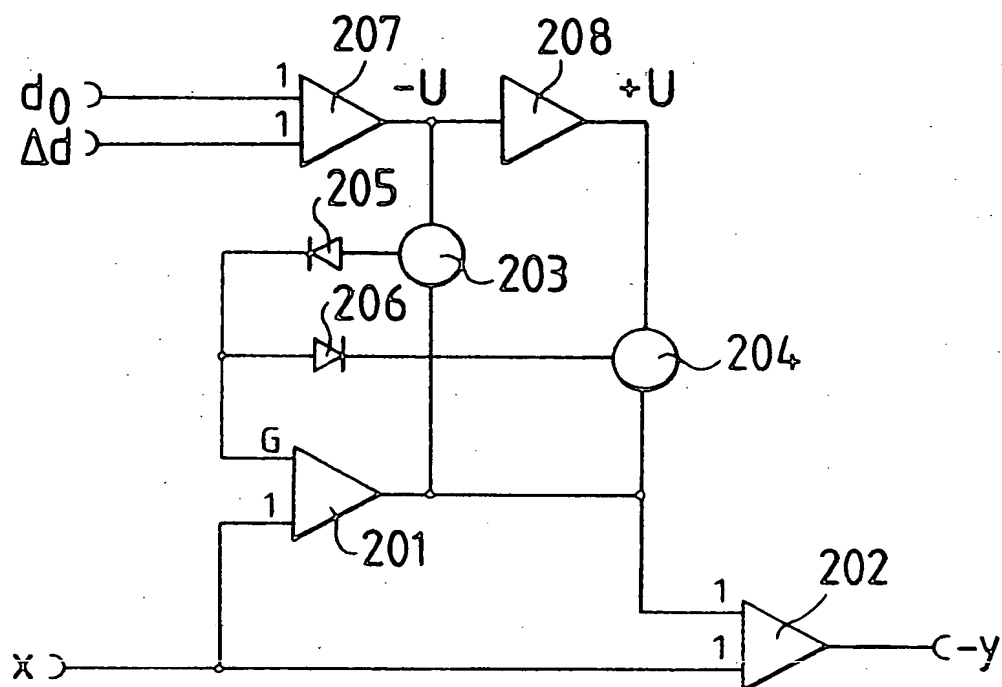


FIG. 4

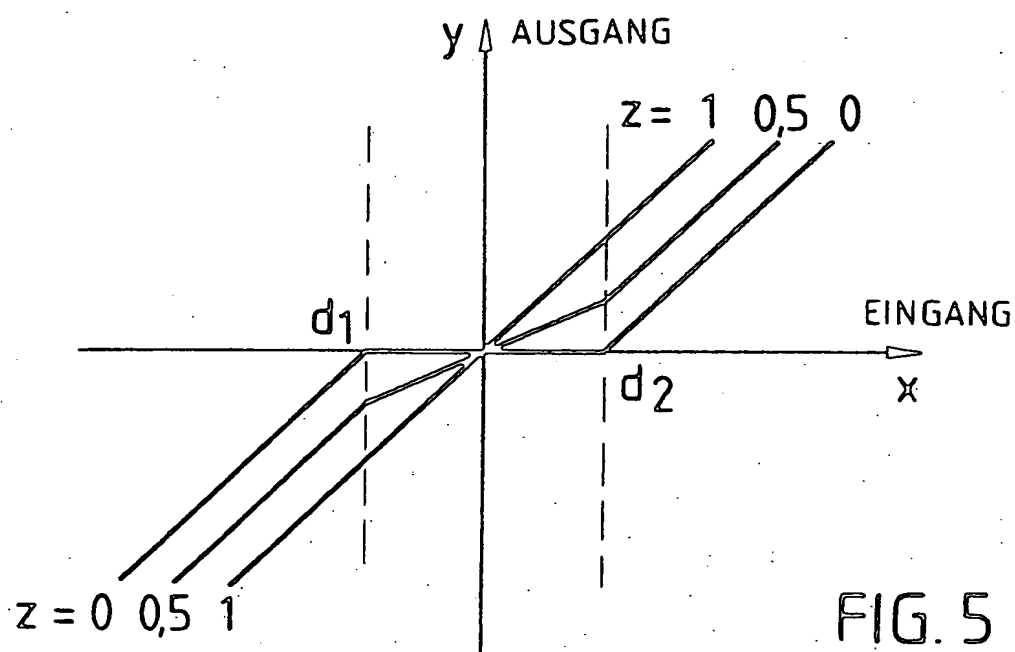


FIG. 5

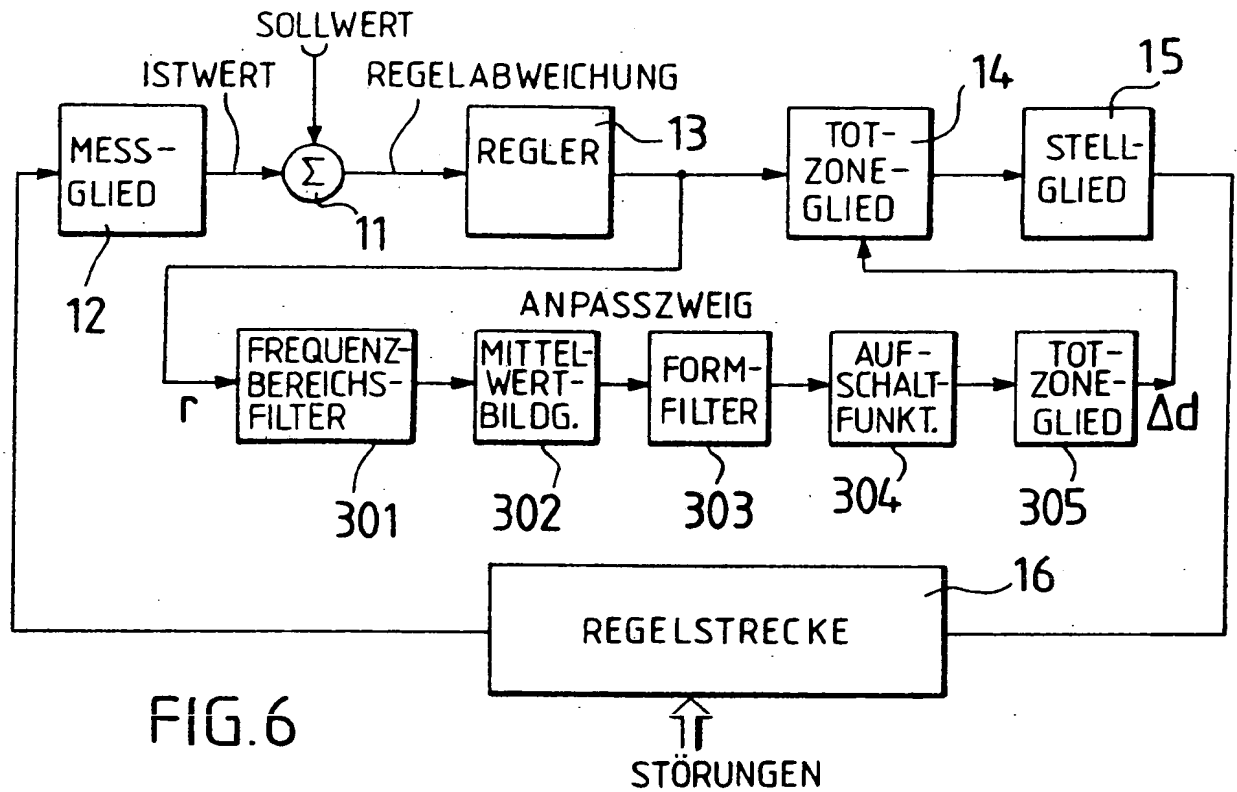


FIG. 6

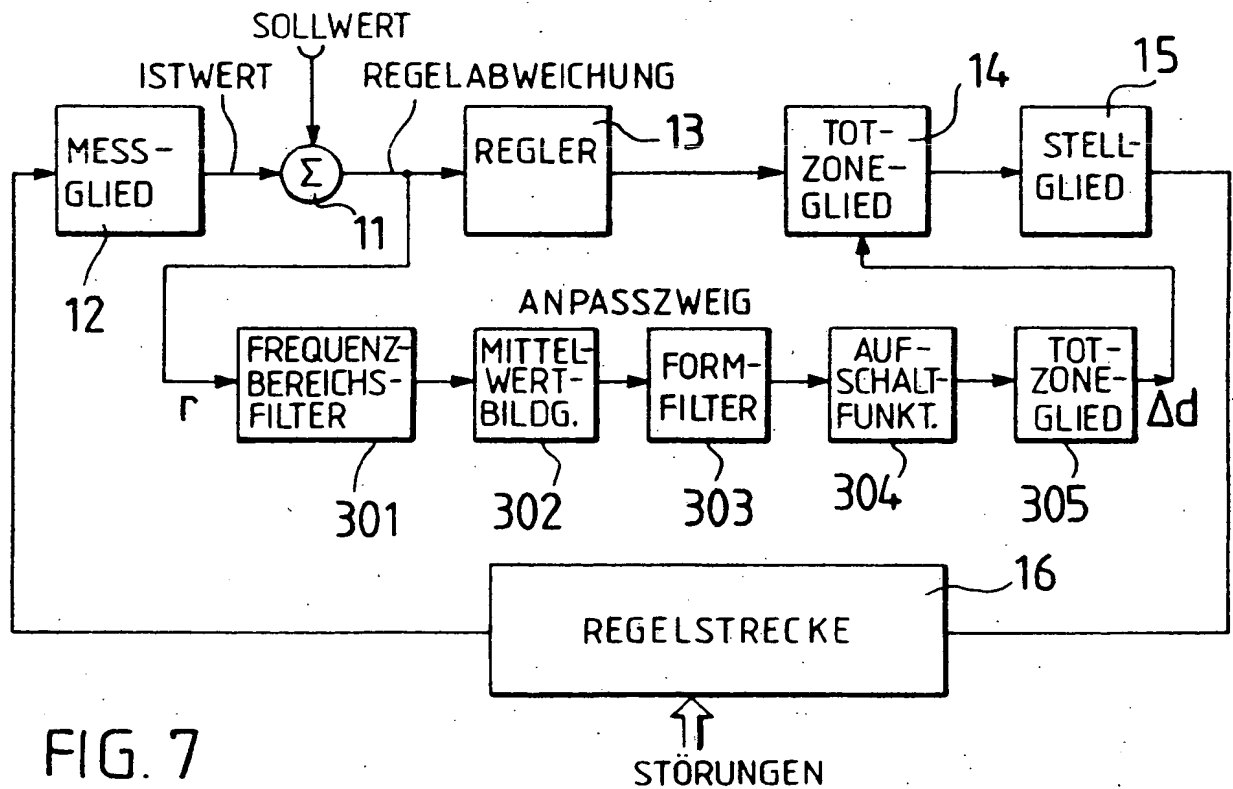


FIG. 7

